

## **Einfluss der Wellenverlagerung auf das Strömungsfeld im Schmier- spalt eines Gleitlagermodells**

**Effect of shaft displacement on the flow field in the lubricating gap of a journal  
bearing model**

**Matthias Nobis<sup>1</sup>, Peter Reinke<sup>2</sup>, Marcus Schmidt<sup>2</sup>, Christoph Egbers<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Westsächsische Hochschule Zwickau  
Fakultät für Kraftfahrzeugtechnik  
Postfach 20 10 37  
D-08012 Zwickau

<sup>2</sup> HAWK Hochschule Hildesheim/Holzminden/Göttingen  
Fakultät Naturwissenschaften und Technik  
Lehrgebiet Fluidtechnik  
Von-Ossietzky-Straße 99  
37085 Göttingen

<sup>3</sup> Brandenburgische Technische Universität  
Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre  
Siemens-Halske-Ring 16  
D-03046 Cottbus

Hydrodynamisch geschmiertes Radialgleitlager, Gleitlagerströmung,  
Taylor, Couette, Journal Bearing,

### **Zusammenfassung**

Die Strömung in engen Schmierespalten ist spätestens seit der Arbeit von *Reynolds* über die Theorie der Schmierung im Jahr 1886 bis heute Gegenstand zahlreicher Veröffentlichungen in der Grundlagenforschung. Die in diesem Zusammenhang gewonnenen Erkenntnisse sind auf dem Gebiet der Auslegung und Weiterentwicklung betriebssicherer Gleitlager von entscheidender Wichtigkeit. Die Gleitlager in aktuellen Verbrennungsmotoren sind durch die stetige Steigerung der spezifischen Leistung mittels Downsizing hoch belastete Bauteile. Die Aufgabe, einen dauerhaft zuverlässigen Betrieb der Gleitlager sicherzustellen, ist damit immer wiederkehrend.

Im speziellen Fall der Pleuellager handelt es sich um dynamisch belastete Gleitlager. Das Zusammenspiel von eingeleiteten Gas- und Massenkräften am Pleueltrieb eines Verbrennungsmotors generiert eine dynamische Lagerlast, welche in Betrag und Richtung zeitlich veränderlich ist. Im Gegensatz zu statisch belasteten Radialgleitlagern nimmt die Pleuellage keine unveränderliche exzentrische Stellung innerhalb der Pleuellagerhülse ein, sondern vollführt radiale Sekundärbewegungen. Da die eingeleiteten Lagerkräfte einen

periodischen Charakter besitzen, bewegt sich die Welle auf einer so genannten Wellenverlagerungsbahn, welche nach *Küntscher* einmal innerhalb eines Arbeitsspiels durchlaufen wird.

Für die experimentelle Untersuchung der Strömungsvorgänge im Schmierpalt, wird in Erweiterung zum Prüfstands Aufbau, welcher erstmals 2012 von *Nobis et al.* vorgestellt wurde, mit einem mechanischen Antrieb eine dynamische Exzentrizitätsverstellung realisiert. Es wird damit möglich, in vereinfachter Form eine Wellenverlagerung modellhaft abzubilden. Der Einsatz von laseroptischer Messtechnik soll in diesem Zusammenhang die Ermittlung lokaler Geschwindigkeitsverteilungen ermöglichen. Begleitend zu den Messungen werden unter der Verwendung eines speziellen Rechenalgorithmus numerische Strömungssimulationen durchgeführt. Für einen globaleren Überblick über das Strömungsfeld im Schmierpalt werden nach einem Ergebnisabgleich zwischen Experiment und Simulation auf Basis von Geschwindigkeitsprofilen dreidimensionale Vektorfelder aufgezeigt.

## Einleitung

Mit der Rotation einer Welle in den Lagerschalen eines Radialgleitlagers entsteht aufgrund der geltenden Haftbedingungen des Fluids an der rotierenden Welle bzw. an der feststehenden Lagerschale im Schmierpalt eine Schleppströmung. Diese hervorgerufene Grundströmung ist als Couette-Strömung bekannt. Sowohl eventuelle geometrische Unstetigkeiten wie Taschen und Bohrungen in der Welle bzw. in der Lagerschale als auch das Auftreten weiterer Sekundärströmungen im Schmierpalt überlagern die Couette-Strömung und prägen das Erscheinungsbild der komplexen Gleitlagerströmung. Ein hydrodynamisch geschmiertes Gleitlager muss stets mit ausreichend Schmiermittel versorgt werden. Zum einen wird damit die an den offenen axialen Lagerenden austretende Leckageölmenge wieder zugeführt. Zum anderen werden bei Kurbelwellenhauptlagern mittels in der Welle eingebrachter Ölkanäle weitere Lagerstellen mit Schmieröl versorgt, was wiederum eine zusätzliche Ölzufuhr im Hauptlager erfordert.

Die Einbringung von Öl in den Schmierpalt erfolgt über eine radiale Einlassbohrung in der Lagerschale. Für eine sichere Verteilung des Öls im Schmierpalt wird im Fall von Kurbelwellenhauptlagern oftmals eine Nut in der Lagerschale vorgesehen. Mit der Überlagerung der einzeln genannten Strömungen entstehen dreidimensionale, instationäre Strömungsstrukturen. *Nobis et al.* berichteten 2012 und 2013 über die Zusammenhänge zwischen der Couette-Strömung mit überlagertem Seitenfluss in Abhängigkeit von lagertypischen Einstellungsparametern. Alle gezeigten Untersuchungsergebnisse basieren auf der Vorgabe einer statisch eingestellten Exzentrizität.

Kurbelwellenhauptlager sind instationär belastete Radialgleitlager und sind folglich durch eine zeitlich veränderliche Exzentrizität gekennzeichnet. Der Betrag und die Richtung der Verlagerung einer Welle innerhalb der Lagerschale folgen den eingeleiteten Kräften. Die Welle bewegt sich damit auf einer so genannten Wellenverlagerungsbahn. Der genaue Verlauf einer Wellenverlagerungsbahn ist von einer großen Anzahl an Parametern abhängig. Als wichtigste Einflussgrößen seien hier die Motorbauart hinsichtlich Zylinderanzahl und -anordnung, Arbeitsverfahren, Lastzustand und Drehzahl genannt. Bedingt durch die radiale Relativbewegung der Welle gegenüber der Lagerschale wird im Schmierpalt eine weitere Strömungsform, die Verdrängungsströmung, erzeugt. In Erweiterung zu den von *Nobis et al.* veröffentlichten Untersuchungsergebnissen, soll im Rahmen dieses Beitrages der Einfluss der Verdrängungsströmung auf das Strömungsfeld im Schmierpalt eines Gleitlagermodells aufgezeigt werden.

## Kenngrößen und Parameter des Modells

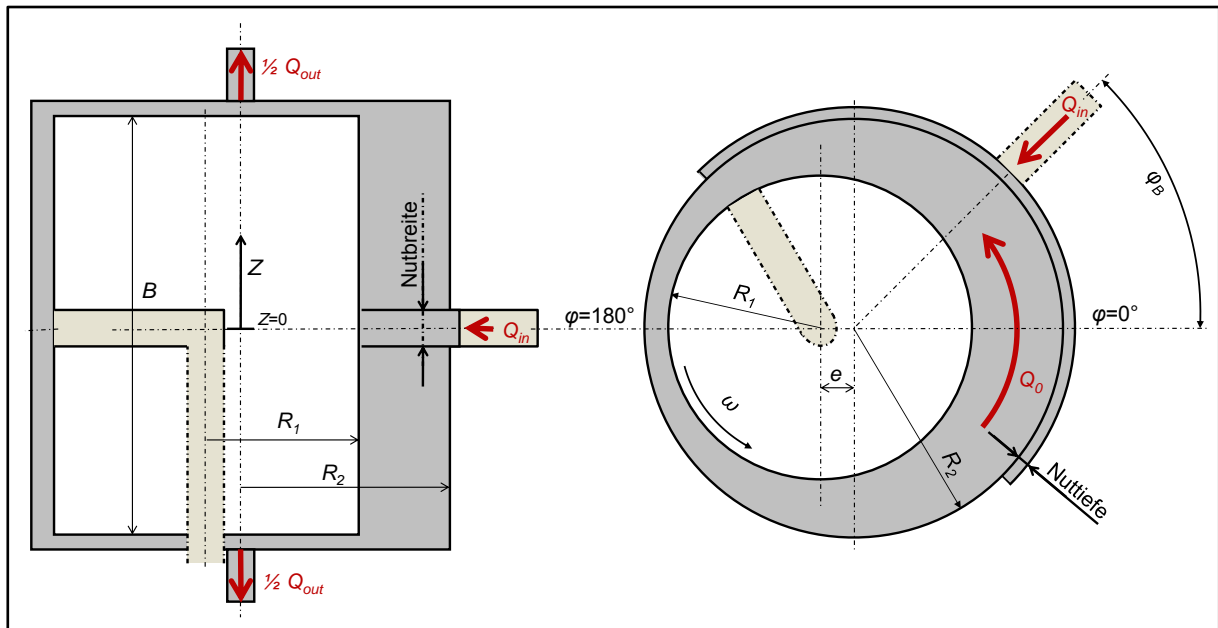


Abb. 1: Geometrische Kenngrößen des Gleitlagermodells

Abb. 1 zeigt einen schematischen Längs- und Querschnitt durch das Gleitlagermodell. Die für Kurbelwellenhauptlager charakteristische Schmiernut in der Lagerschale wird im Modell mit einer maßstäblichen Nuttiefe und Nutbreite berücksichtigt. In den Gleichungen 1 bis 7 werden charakteristische Parameter definiert. Die relative Exzentrizität  $\varepsilon$  ist richtungsunabhängig und setzt den Abstand  $e$  der Mittenachsen von Außen- und Innenzylinder ins Verhältnis zur mittleren Spaltweite  $H_0$ . Entsprechend den Erläuterungen im Punkt Prüfstandsaufbau setzt sich die Exzentrizität aus zwei Anteilen zusammen. Der erste Anteil wird durch die exzentrische Grundstellung des Außenzylinders definiert und bildet damit die statische Exzentrizität. Der zweite Anteil wird durch die oszillierende Bewegung des Außenzylinders im Betrieb hervorgerufen und wird folglich als dynamische Exzentrizität bezeichnet. Der Winkel  $\varphi = 0^\circ$  befindet sich definitionsgemäß im weitesten Spalt. Ausgehend von  $\varphi = 0^\circ$  besitzt die radiale Einlassbohrung im Außenzylinder eine Winkellage  $\varphi_B$  und charakterisiert damit die Richtung der statischen Exzentrizität. Die Wirkrichtung der dynamischen Exzentrizität wird separat gekennzeichnet. Die relative Spaltweite des hier vorgestellten Lagermodells beträgt  $\Psi = 2,5\%$  und ist damit gegenüber einem realen Gleitlager mit einer durchschnittlichen relativen Spaltweite von  $\Psi = 0,1\%$  um ein Vielfaches größer. Um dennoch eine Vergleichbarkeit der Strömung sicherzustellen, wird die Reynoldszahl  $Re$  entsprechend der Gleichung 5 definiert.

$$H_0 = R_2 - R_1 \quad (1) \quad Re = \frac{H_0 \cdot R_1 \cdot \omega}{\nu} \quad (5)$$

$$\Psi = \frac{H_0}{R_1} \quad (2) \quad Q_0 = \frac{1}{2} H_0 \cdot B \cdot U_1 \quad (6)$$

$$\varepsilon = \frac{e}{H_0} \quad (3) \quad \alpha = \frac{Q_{in}}{Q_0} \quad (7)$$

$$U_1 = \omega \cdot R_1 \quad (4)$$

## Prüfstands Aufbau

Im Gleitlagermodell nach Abb. 2 sind die typischen geometrischen Eigenschaften eines Kurbelwellenhauptlagers berücksichtigt. Die Oberschale eines Kurbelwellenhauptlagers ist mit einer Ölversorgungsbohrung versehen, welche zumeist in einer rechteckigen Nut mündet. Der größeren erforderlichen Tragfähigkeit geschuldet, ist die Unterschale oftmals ohne geometrische Besonderheiten als glatte Lagerschale ausgeführt. Der Außenzylinder des Gleitlagermodells ist demzufolge mit einer radialen Einlassbohrung und einer über 180° umlaufenden Rechtecknut ausgestaltet. Der innerhalb des Außenzylinders rotierende Innenzylinder besitzt gemäß dem vorhandenen Ölkanal in einer Kurbelwelle eine radiale Auslassbohrung. Die korrekte Abbildung, der an den offenen axialen Lagerenden austretenden Leckageölmenge, wird am Gleitlagermodell mittels axialer Auslässe realisiert. Mithilfe von Regelventilen kann der Anteil an zuströmender Fluidmenge sowie die Aufteilung auf die einzelnen Auslässe bedarfsgerecht eingestellt werden. Für die exakte Bemessung der einzelnen Teilvolumenströme sind Durchflussmesser nach dem Ultraschallmessprinzip im Einsatz.

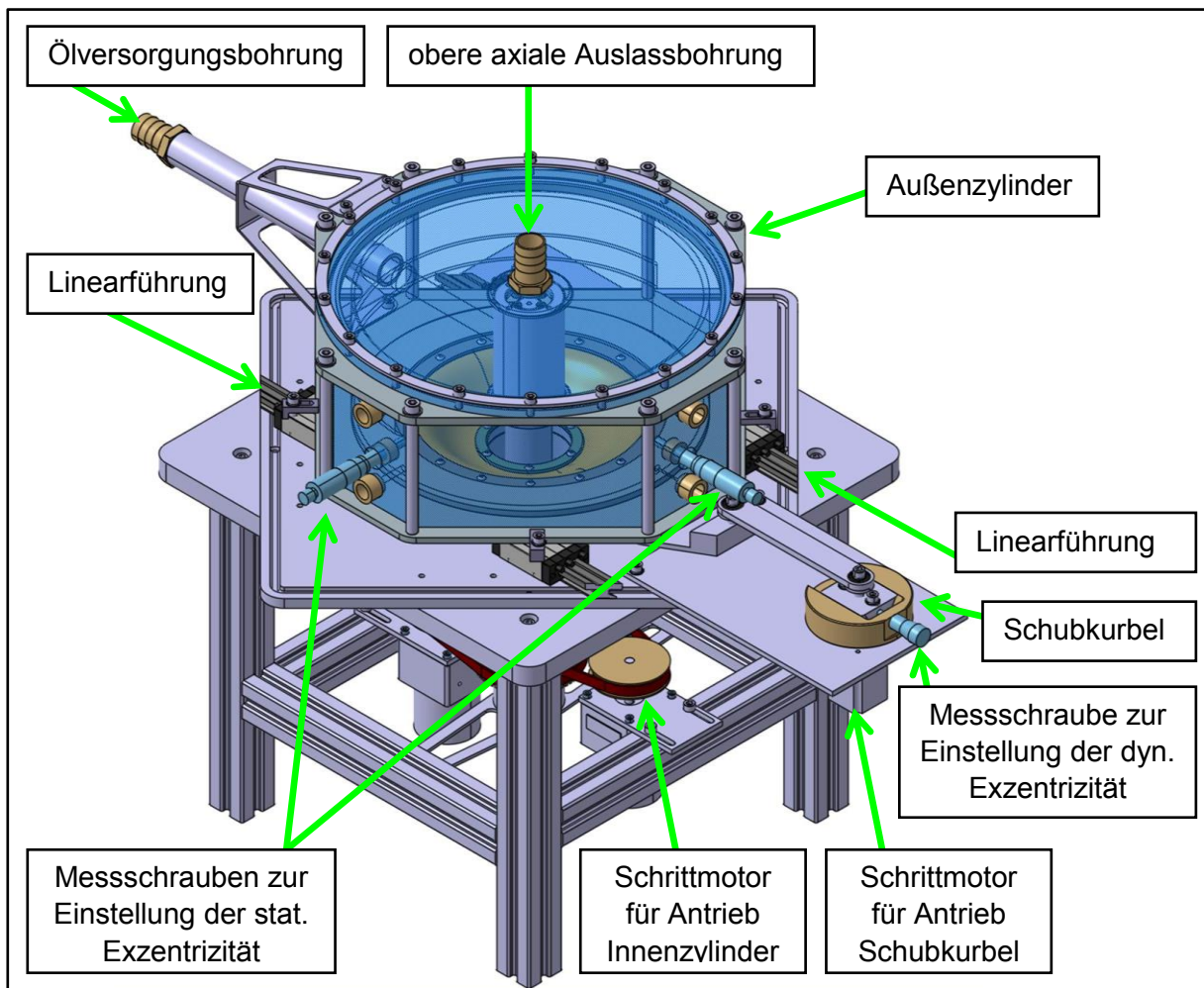


Abb. 2: Gleitlagermodell aus Acrylglas mit verschiebbarem Außenzylinder

Die Abbildung einer Wellenverlagerungsbahn erfolgt am Gleitlagermodell in vereinfachter Form. Anstelle der eigentlich dafür erforderlichen Sekundärbewegung des Innenzylinders wird der Außenzylinder oszillierend in einer Ebene verschoben. Für diesen Zweck ist der Außenzylinder auf einem Linearführungssystem aufgebaut und mit einem Schubkurbelgetriebe verbunden. Die im Außenzylinder befindlichen Messschrauben dienen zur Einstellung

einer statischen Exzentrizität. Somit wird eine gezielte Grundstellung des Außenzylinders gegenüber dem Innenzylinder festgelegt. Der Kurbeltrieb zur Erzeugung der oszillierenden Bewegung besitzt ein klemmbares Schubstück, mit welchem die Amplitude der oszillierenden Bewegung bzw. die maximale dynamische Exzentrizität eingestellt werden kann. Die genaue Positionierung des Schubstückes erfolgt mit Hilfe einer weiteren Messschraube. Der Antrieb des Innenzylinders und der Schubkurbel erfolgt jeweils durch einen Schrittmotor. Die Ansteuerung der beiden Motoren wird über ein gemeinsames Steuergerät realisiert. Mittels entsprechender Drehwinkelsensorik wird im Betrieb dauerhaft die Drehzahl beider Motoren überwacht und gegebenenfalls synchronisiert. Somit wird die gezielte Einstellung einer dynamischen Exzentrizität bei bestimmten Drehwinkellagen des Innenzylinders möglich. Für die berührungslose Messung lokaler Strömungsgeschwindigkeiten im Spalt ist in axialer Richtung über dem Gleitlagermodell das LDA montiert. Durch dessen Befestigung an einem zweiachsigen Traversiersystem kann das Messvolumen zielgenau im Spalt positioniert werden. Da im Spalt eine instationäre bzw. eine periodisch stationäre Strömung vorliegt, muss die Messung der Geschwindigkeiten mit Winkelbezug erfolgen. Mit Hilfe einer Lichtschranke wird mit jeder Umdrehung des Innenzylinders ein Impuls generiert, der dem Signalprozessor des LDA einer korrekten Zuordnung von Geschwindigkeitswerten dient. Die Phasenmittelung der Geschwindigkeiten erfolgt über einen Drehwinkel von einem Grad, d.h. nach Abschluss einer Messung an einer Messposition liegen 360 Geschwindigkeitswerte vor.

### Begleitende numerische Simulationen

Die numerischen Simulationen werden mit dem Programmpaket OpenFOAM durchgeführt. Das Numerische Verfahren basiert auf der Finiten-Volumen-Methode unter Verwendung der Massenbilanzgleichung (8) und der dreidimensionalen, inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen (9).

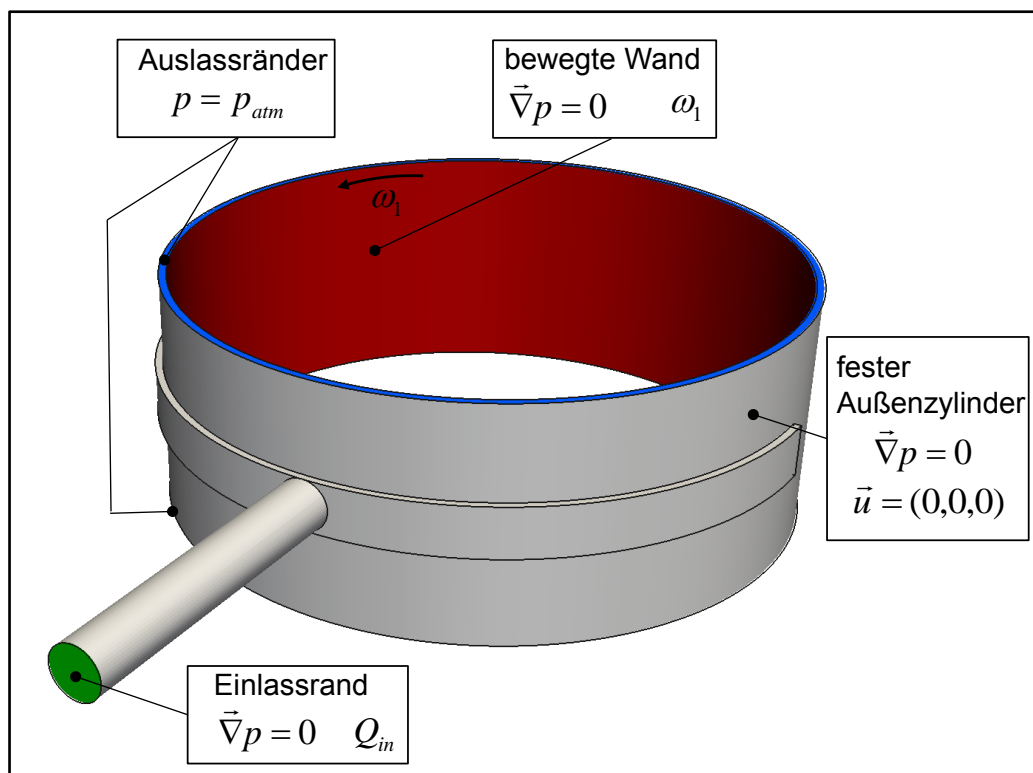


Abb. 3: Modell der numerischen Strömungssimulation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = \vec{\nabla} p + \mu \vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \vec{u}) + \rho \vec{g} \quad (9)$$

Das Volumennetz des numerischen Gleitlagermodells ist in Abb. 3 dargestellt. Durch den blockstrukturierten Aufbau werden nahezu orthogonale Hexaederzellen im Zylinderspalt generiert, welche mit eindeutigen Zellnachbarschaftsbeziehungen die Effizienz des numerischen Löserns steigern. Die radiale Einlassbohrung im Außenzylinder wird mit einem O-Netz diskretisiert, welches eine optimale, wandadaptierte Netzstruktur aufweist.

## Ergebnisse der Untersuchungen

Die im Rahmen dieses Beitrages gezeigten Geschwindigkeitsprofile zeigen jeweils die Umfangskomponente der lokalen Geschwindigkeit auf. Die Geschwindigkeitsverteilungen charakterisieren die Strömung im Schmierpalt des Gleitlagermodells an einem ausgesuchten Ort zu einem festen Zeitpunkt. Aufgrund der Instationarität der Strömung, sind alle dargestellten Geschwindigkeitsprofile als Momentaufnahme bei einem definierten Drehwinkel des Innenzylinders zu verstehen. In den Untersuchungen ist der Einfluss der Auslassbohrung im rotierenden Innenzylinder nicht berücksichtigt. Das Abströmen der zugeführten Fluidmenge erfolgt demzufolge ausschließlich über die obere und untere Auslassbohrung an den axialen Systemenden.

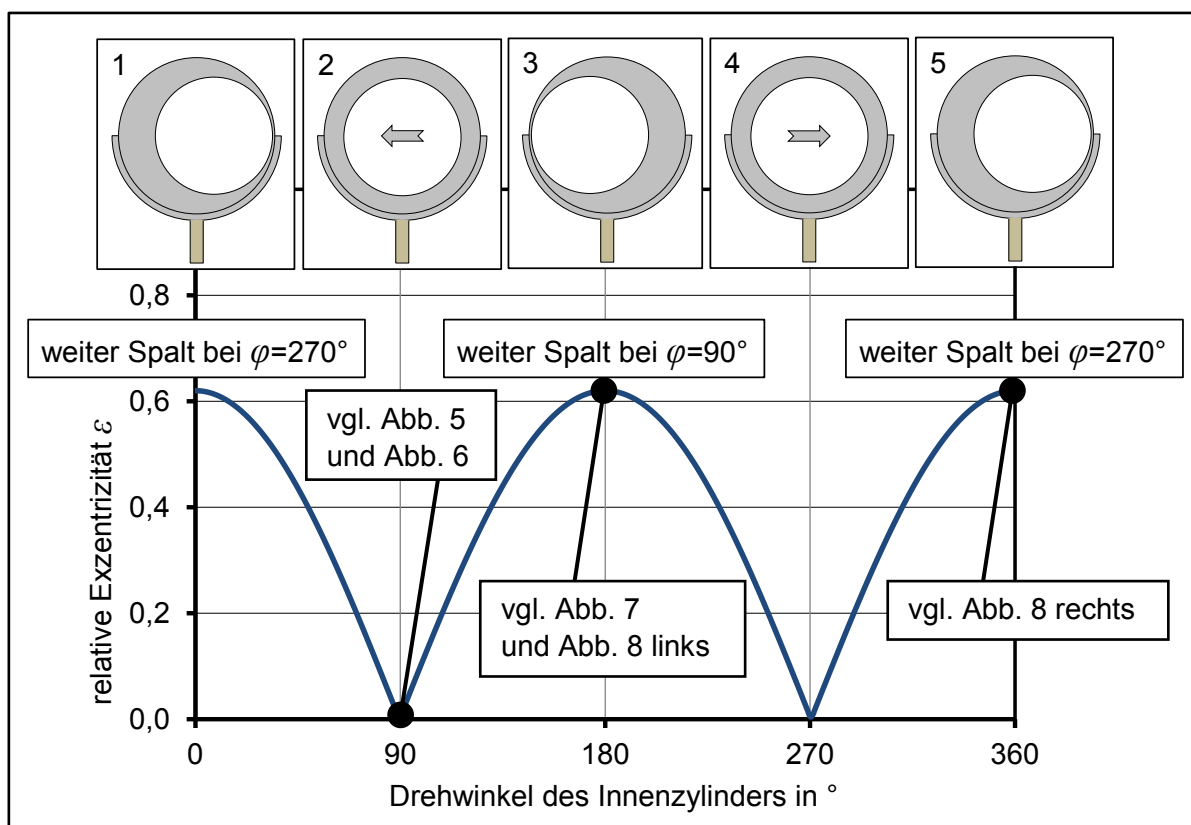


Abb. 4: Verlauf der relativen Exzentrizität über eine Umdrehung des Innenzylinders bei  $\varepsilon_{stat} = 0\%$  und  $\varepsilon_{dyn} = 62\%$

Im Unterschied zu den von *Nobis et al.* 2013 und 2014 gezeigten Geschwindigkeitsverteilungen ist die Exzentrizität jedoch nicht als konstante Größe anzusehen. Aufgrund der oszillierenden Bewegung des Außenzylinders unterliegt die Exzentrizität einem periodischen

Zyklus, der einmal mit jeder Innenzylinderumdrehung durchlaufen wird. Der Vorgang ist einer Wellenverlagerung in einem realen Gleitlager mit den folgenden zu beachtenden Unterschieden ähnlich. Zum einen erfolgt die reale radiale Bewegung einer Kurbelwelle in den Hauptlagerstellen relativ zur feststehenden Lagerschale und nicht umgekehrt wie im Fall des Gleitlagermodells. Zum anderen bewegt sich die Welle eines realen Gleitlagers nicht ausschließlich oszillatorisch in einer Ebene. Dennoch erzeugt die radiale Relativbewegung zwischen Außen- und Innenzylinder im Gleitlagermodell eine vergleichbare Verdrängungsströmung aus dem sich verengenden Spaltbereich in den sich aufweitenden Spaltbereich. Aufgrund der wechselnden Lage des kleiner bzw. größer werdenden Spaltbereichs wechselt die Verdrängungsströmung entsprechend periodisch die Flussrichtung. Zusammen mit der Couette-Strömung und der über die Einlassbohrung radial eingebrachten Rohrströmung entsteht im Schmierpalt ein vielschichtiges Strömungsfeld.

Abb. 4 zeigt den Verlauf der relativen Exzentrizität über eine Umdrehung des Innenzylinders. Die Wirkebene der dynamischen Exzentrizität bzw. die Richtung der oszillatorischen Bewegung des Außenzylinders liegt senkrecht zur Mittelachse der Einlassbohrung. Entsprechend der schematischen Darstellung 1 in Abb. 4 oben befindet sich der weiteste Spalt bei einem Drehwinkel des Innenzylinders von  $0^\circ$  bei  $\varphi = 270^\circ$ . Bis zu einem Drehwinkel des Innenzylinders von  $180^\circ$  (schematische Darstellung 3 in Abb. 4) verkleinert sich im weiteren Verlauf der Spalt bei  $\varphi = 270^\circ$  während sich bei  $\varphi = 90^\circ$  der Spalt vergrößert. Bei einem Drehwinkel des Innenzylinders von  $90^\circ$  bzw.  $270^\circ$  (schematische Darstellungen 2 und 4 in Abb. 4) wird die relative Exzentrizität zu null und es liegt für diesen Moment eine konzentrische Systemkonfiguration vor. Zusätzlich ist mit der Abb. 4 eine anschauliche Zuordnung der folgenden dargestellten Geschwindigkeitsprofile zum jeweilig momentanen Systemzustand gegeben.

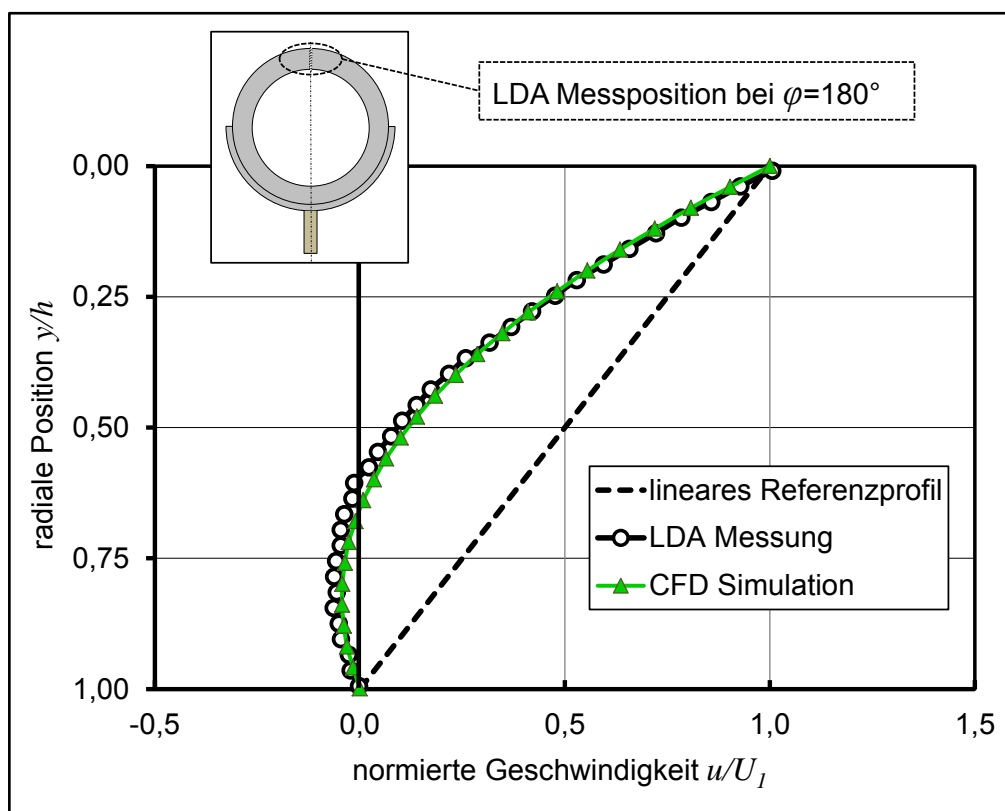


Abb. 5: Gemessenes und berechnetes Geschwindigkeitsprofil bei einem Drehwinkel des Innenzylinders von  $90^\circ$ ,  $\psi = 2,5\%$ ,  $Re = 58$ ,  $\epsilon_{stat} = 0\%$ ,  $\epsilon_{dyn} = 62\%$ ,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\varphi = 180^\circ$



Ein klassischer Taylor-Couette-Apparat weist keine geometrischen Unstetigkeiten wie Nuten oder Bohrungen auf. Im Spalt bildet sich damit unterhalb einer kritischen Reynoldszahl eine ungestörte Couette-Strömung aus. Es ist weithin bekannt, dass bei konzentrischer Einstellung des Systems an allen Stellen im Spalt ein lineares Geschwindigkeitsprofil der Umfangskomponente zu erwarten ist. Werden beim gezeigten Gleitlagermodell Geschwindigkeitsmessungen bei einem Winkel von  $\varphi = 180^\circ$  durchgeführt, so befindet sich der Messort fernab der Nut und genau gegenüberliegend der Einlassbohrung. Damit haben die Nut und Einlassbohrung nur noch einen zu vernachlässigenden Einfluss auf das lokale Strömungsfeld bei  $\varphi = 180^\circ$ . Durchgeführte Messungen können diesen Zusammenhang belegen.

Abb. 5 zeigt Geschwindigkeitsprofile in genau dieser Konfiguration. Es wird kein Fluid über die Einlassbohrung eingebracht ( $\alpha = 0\%$ ). Der Drehwinkel des Innenzylinders beträgt  $90^\circ$  und damit ist nach Abb. 4 die relative Exzentrizität  $\varepsilon = 0\%$ . Die Geschwindigkeitsprofile weisen jedoch im Vergleich zum gezeigten linearen Referenzprofil eine deutliche Krümmung auf. Aufgrund der dynamischen Exzentrizitätsverstellung liegt im Spalt eine periodisch stationäre Strömung vor. Infolge der Oszillation des Außenzylinders entsteht im Schmierpalt eine Verdrängungsströmung, welche die Couette-Strömung überlagert. Bei dem gezielt ausgesuchten Zeitpunkt (bei einem Drehwinkel des Innenzylinders von  $90^\circ$ ) wird deutlich, wie stark die Verdrängungsströmung die Couette-Strömung beeinflusst. Für eine bessere Vergleichbarkeit ist zusätzlich ein lineares Referenzprofil dargestellt, welches bei einer statisch konzentrischen Systemeinstellung zu erwarten ist. Da sich das Gleitlagermodell zum genannten Zeitpunkt in einem Zustand befindet, in dem eine Spaltaufweitung bei  $\varphi = 90^\circ$  und eine Spaltverkleinerung bei  $\varphi = 270^\circ$  stattfindet, stellt sich eine Verdrängungsströmung ein, welche am Messort entgegen dem Drehsinn des Innenzylinders gerichtet ist. Die Folge ist eine konkave Krümmung des Geschwindigkeitsprofils und die Ausbildung eines kleinen Rückströmgebiets.

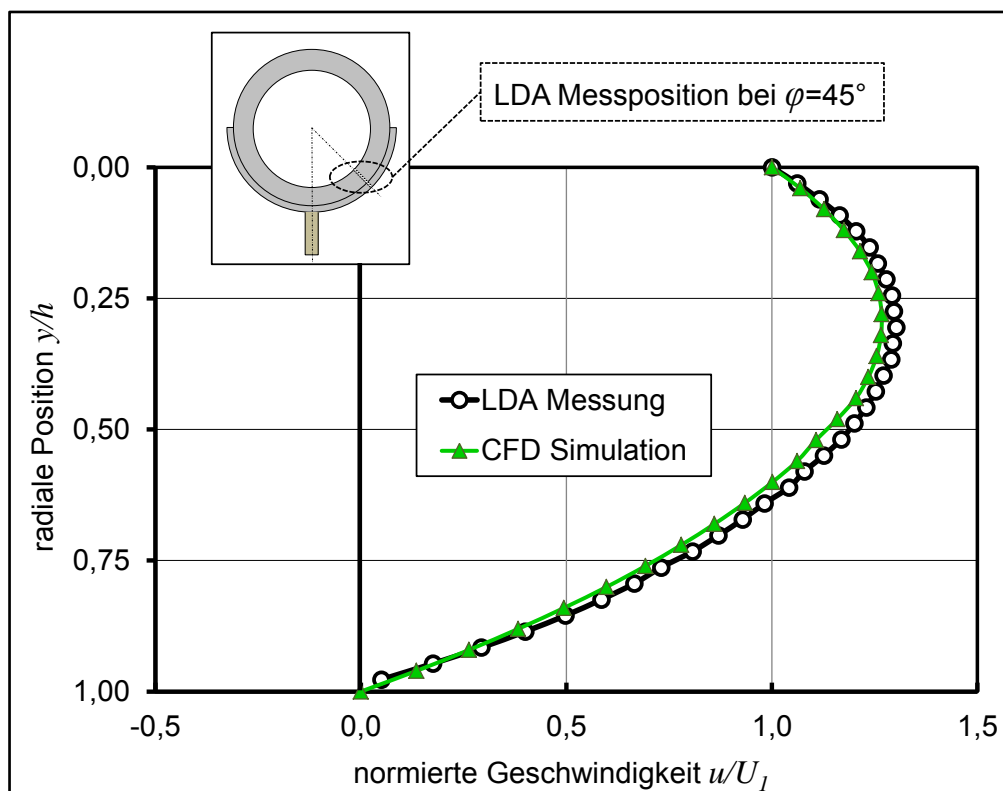


Abb. 6: Gemessenes und berechnetes Geschwindigkeitsprofil bei einem Drehwinkel des Innenzylinders von  $90^\circ$ ,  $\psi = 2,5\%$ ,  $Re = 58$ ,  $\varepsilon_{stat} = 0\%$ ,  $\varepsilon_{dyn} = 62\%$ ,  $\alpha = 50\%$ ,  $\varphi = 45^\circ$



Im Unterschied zu Abb. 5 zeigt Abb. 6 Geschwindigkeitsprofile bei einer Messposition von  $\varphi = 45^\circ$  unter dem zusätzlichen Einfluss eines eingestellten Versorgungsvolumenstroms im Verhältnis  $\alpha = 50\%$ . Die Verdrängungsströmung und der durch die Einlassbohrung zusätzlich aufgeprägte Versorgungsvolumenstrom generieren im untersuchten Spaltbereich konvex gekrümmte Geschwindigkeitsprofile. Die normierte Strömungsgeschwindigkeit ist im Spaltbereich nahe dem Innenzylinder deutlich größer als eins. Damit eilt die dortige Strömung der rotatorischen Bewegung des Innenzylinders voraus.

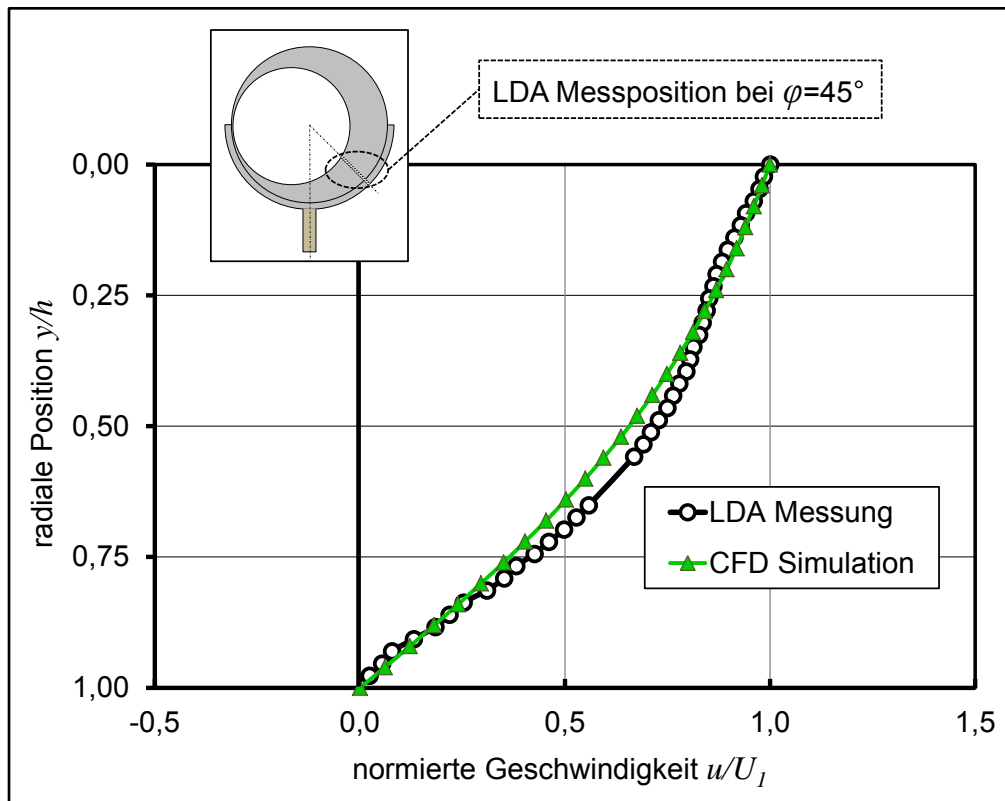


Abb. 7: Gemessenes und berechnetes Geschwindigkeitsprofil bei einem Drehwinkel des Innenzylinders von  $180^\circ$ ,  $\psi = 2,5\%$ ,  $Re = 58$ ,  $\varepsilon_{stat} = 0\%$ ,  $\varepsilon_{dyn} = 62\%$ ,  $\alpha = 50\%$ ,  $\varphi = 45^\circ$

Die in Abb. 7 dargestellten Geschwindigkeitsprofile charakterisieren die Strömung bei  $\varphi = 45^\circ$  unter den gleichen Einstellungsparametern wie in Abb. 6, jedoch zu einem späteren Zeitpunkt. Der Drehwinkel des Innenzylinders beträgt  $180^\circ$  und damit ist nach Abb. 4 die momentane relative Exzentrizität  $\varepsilon = 62\%$ . Es resultieren zu diesem Zeitpunkt im untersuchten Spaltbereich Geschwindigkeitsprofile mit geringer konvexer Krümmung. Prinzipiell ist bei allen gezeigten Profilen eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentell gemessenen und numerisch berechneten Geschwindigkeitswerten erkennbar. Dies unterstreicht die Richtigkeit der durchgeführten numerischen Simulationen hinsichtlich der Wahl der vorzugebenden Randbedingungen und des Netzaufbaus. Mit der Validierung der Numerik an ausgesuchten experimentellen Daten wird die korrekte Abbildung der gesamten Strömung im Schmierpalt des Gleitlagermodells erreicht. Es kann in diesem Zusammenhang ein umfassenderer Überblick über den Strömungszustand im Gleitlagermodell gegeben werden. Die in der Abb. 8 dargestellten Stromlinienbilder zeigen die Verteilung der eingebrachten Fluidmenge im Schmierpalt an zwei beispielhaften Zeitpunkten. Im linken Bild beträgt der Drehwinkel des Innenzylinders  $180^\circ$ . Demzufolge liegt bei  $\varphi = 90^\circ$  der weite Spalt. Das durch die Einlassbohrung radial eingebrachte Fluid fließt zum Großteil mit der Drehrichtung des Innenzylinders in Richtung des weiten Spaltbereichs bei  $\varphi = 90^\circ$  ab. Nur direkt in der Nut gibt es in Drehrichtung vor der Einlassbohrung einen kleinen Anteil an stromaufwärts fließendem

Fluid. Demgegenüber beträgt der Drehwinkel des Innenzylinders im rechten Bild  $360^\circ$ . Der weite Spalt liegt damit bei  $\varphi = 270^\circ$ . Aufgrund der Drehrichtung des Innenzylinders und der daraus resultierenden Couette-Strömung strömt das eingebrachte Fluid nicht vorrangig in die Richtung des weiten Spaltes ab. Das eingebrachte Fluid verteilt sich um die Einlassbohrung in alle Spaltrichtungen zu annähernd gleichen Teilen. Auf dem Weg in Richtung des engsten Spaltes erfolgt einerseits eine Umlenkung zu den axialen Systemrändern und andererseits eine Umlenkung in die Nut. Innerhalb der Nut bildet sich ein markantes Rückströmgebiet.

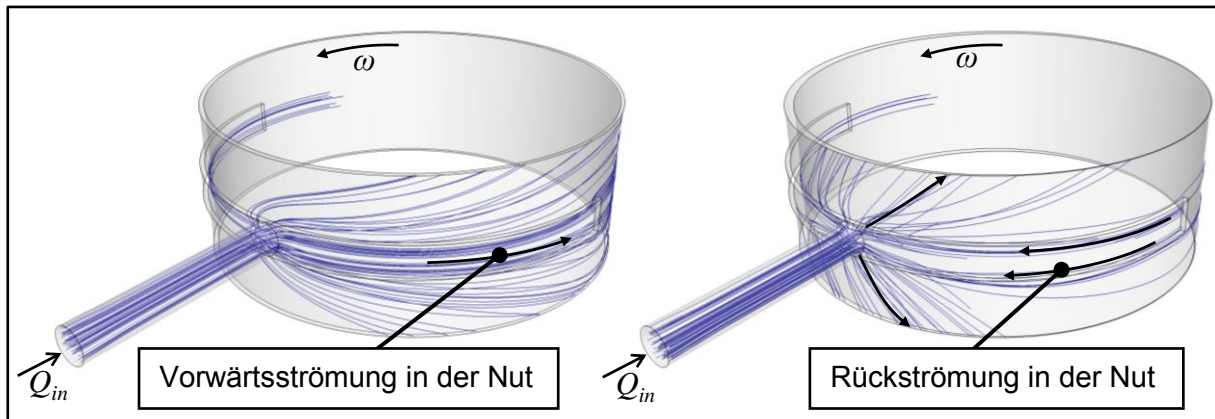


Abb. 8: Stromlinienbilder bei einem Drehwinkel des Innenzylinders von  $180^\circ$  (links) und  $360^\circ$  (rechts) bei  $\psi = 2,5\%$ ,  $Re = 58$ ,  $\varepsilon_{stat} = 0\%$ ,  $\varepsilon_{dyn} = 62\%$ ,  $\alpha = 50\%$ ,  $\varphi = 45^\circ$

## Zusammenfassung und Ausblick

Im gezeigten Gleitlagermodell können unter Beachtung der Reynoldszahl gezielt Strömungszustände eingestellt werden, die den Strömungsvorgängen im engen Schmier-spalt von realen Gleitlagern ähnlich sind. Für die quantitative Bewertung der Strömung werden Geschwindigkeitsmessungen in ausgesuchten Spaltbereichen durchgeführt. Die räumliche Enge am Messort und die zeitliche Veränderlichkeit der Strömung schränken die Auswahl an einsetzbarer Messtechnik ein. Das LDA bietet mit der kleinen räumlichen Ausdehnung des Messvolumens die Möglichkeit einer berührungslosen Geschwindigkeitsmessung bei hoher örtlicher Auflösung. Mit dem Einsatz einer Lichtschranke wird mit jeder Umdrehung ein Resetimpuls generiert, womit sämtliche gemessenen Geschwindigkeitswerte einen Winkelbezug erhalten und infolgedessen die Untersuchung der periodisch stationären Strömung ermöglicht wird.

Die Oszillation des Außenzylinders in einer definierten Ebene kann nicht den Anspruch auf die exakte Abbildung einer charakteristischen Wellenverlagerungsbahn erheben. Dennoch generiert die zyklische Aufweitung bzw. Verkleinerung gezielter Spaltbereiche eine Verdrängungsströmung im Spalt, die sich mit der Couette-Strömung überlagert und damit ein wesentlicher Bestandteil der komplexen, instationären Gleitlagerströmung darstellt.

Die experimentell ermittelten Geschwindigkeitsverteilungen werden mit den Ergebnissen der numerischen Strömungssimulation verglichen. In den gezeigten Beispielen ist eine gute Übereinstimmung in den Ergebnissen erkennbar und damit die korrekte numerische Berechnung des Strömungsfeldes belegt. Neben lokalen Geschwindigkeitsprofilen liefert die Strömungssimulation Geschwindigkeitsvektorfelder im gesamten Spaltbereich und gibt damit einen umfassenderen Überblick über den jeweiligen Strömungszustand. Bei den bis dato durchgeführten Untersuchungen strömt die eingebrachte Fluidmenge ausschließlich über die axialen Systemenden ab. Der Einfluss der Auslassbohrung im rotierenden Innenzylinder

bleibt bisher unberücksichtigt. Speziell auf numerischer Seite ist die Modellierung des Abströmens über die rotierende Auslassbohrung bei veränderlicher Exzentrizität mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden. Weiterführende Untersuchungen werden genau diesen Aspekt aufgreifen und damit weitere Einblicke in die Zusammenhänge der Gleitlagerströmung liefern.

### Verwendete Formelzeichen

$B$	Lagerbreite
$e$	Exzentrizität
$H_0$	mittlere Spaltweite
$h$	lokale Spaltweite
$n$	Drehzahl
$Q_0$	innerer Volumenstrom
$Q_{in}$	zugeführter Volumenstrom
$R_1$	Radius Innenzylinder
$R_2$	Radius Außenzylinder
$Re$	Reynoldszahl
$U_1$	Umfangsgeschwindigkeit des Innenzylinders
$\psi$	normierte Spaltweite
$\varepsilon$	relative Exzentrizität
$\varepsilon_{stat}$	relative statische Exzentrizität
$\varepsilon_{dyn}$	relative dynamische Exzentrizität
$\nu$	kinematische Viskosität
$\varphi$	Winkel
$\varphi_B$	Winkellage der Einlassbohrung
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit

### Literatur

Reynolds, O., 1886: „On the theory of lubrication and its application to Mr. Beauchamp Tower's experiments including an experimental determination of the viscosity of olive Oil“, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 177, pp. 157 - 234

Küntschner, V., Hoffmann, W., 2014: „Kraftfahrzeugmotoren“, 5. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, pp. 1171 - 1260

Nobis, M., Stücke, P., Schmidt, M., Riedel, M., Egbers, C., Herzog, N., Gorenz, P., Christl, A., 2012: „Experimentelle und numerische Untersuchung der instationären Strömung im Schmierpalt eines Gleitlagermodellprüfstandes“, 20. GALA Fachtagung, Rostock

Nobis, M., Reinke, P., Schmidt, M., Redlich, M., Egbers, C., Herzog, N., Gorenz, P., Christl, A., 2013: „Untersuchung der instationären Gleitlagerströmung“, 21. GALA Fachtagung, München

Nobis, M., Reinke, P., Schmidt, M., Klüber, T., Salzmesser, R., Bonitz, T., Selzer, M., Egbers, C., 2014: „Blasenentstehung im hydrodynamisch geschmierten Gleitlager“, 22. GALA Fachtagung, Karlsruhe